



TITLE:

<高校生のページ>レーザーの光で一億度を測る

AUTHOR(S):

南, 貴司; 水内, 亨

CITATION:

南, 貴司 ...[et al]. <高校生のページ>レーザーの光で一億度を測る. Cue 2017, 37: 73-77

ISSUE DATE:

2017-03

URL:

<https://doi.org/10.14989/227445>

RIGHT:

高校生のページ

レーザーの光で一億度を測る

大学院エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻
南 貴 司、水 内 亨

1. はじめに

高校生のみなさん。太陽は、どうして輝いているか知っていますか？太陽は核融合反応で輝いています。太陽を自由につくることができたなら、無限にエネルギーを生み出せるのではないか。”地上に太陽を輝かせよう”、核融合エネルギー研究は、この発想から始まりました。太陽は水素からできています。地上の太陽も水素を原料として、核融合エネルギーを生み出します。燃料の重水素は海水から作ることができるので核融合が実現できれば無尽蔵に海水からエネルギーを取り出すことができるのです [1]。太陽の中心温度は1600万度くらいあると言われており、核融合エネルギーを生み出すには高い温度が必要になります。実際に地上に太陽を輝かせてエネルギーを生成するには、太陽より高い温度、一億度まで水素を加熱する必要があります。この時、水素はイオン（原子核）と電子が電離して、“プラズマ”と呼ばれる状態になります。氷（固体）を加熱すると、水（液体）になり、さらに加熱すると水蒸気（気体）になります。気体を、さらに加熱した時に変化するのがプラズマなのです。こういってしまうと、プラズマとは滅多に見られない特殊なもののように思えてしまいがちですが、実はプラズマは結構身近にあります。例えば照明として使われる蛍光灯の中にはプラズマが生成されています。北極圏や南極圏で見ることのできる美しいオーロラは太陽のプラズマが太陽風として地球に飛んできたものです。また、雷や炎の中にもプラズマは含まれています。このようにプラズマが生成されると、光を発するようになります。



図1 北極圏のオーロラ

2. 核融合エネルギー生成のためプラズマを閉じ込める装置 ヘリオトロン J

核融合エネルギーを実現するためには、この一億度の水素のプラズマを自由に制御することができなくてはなりません。一億度ですから、どこかに閉じ込めておくことさえ難しいのです。そのために磁石の力を利用します。プラズマはイオンと電子が完全に分離している電荷、すなわちプラス、マイナスの電気を持った粒子の集まりです。一方、磁石は磁力線を作り出します。磁石のN極とS極の間に両極を結ぶように目には見えない磁力線が作られるのです。電荷を持った粒子は、この磁石が作り出す磁力線に、らせん状に巻きつくように運動します。つまり磁力線があればプラズマを構成する粒子の動きを制御することができるのです。

コイルに電気を流すと電磁石になることはみなさんご存知ですね。京都大学のヘリオトロン J (Heliotron J) 装置は、幾つかのコイルを組み合わせることで磁力線を作り出しプラズマ粒子の動きを制御し

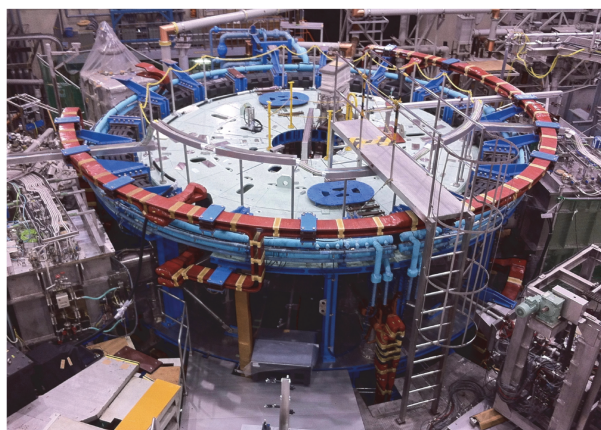


図2 ヘリオトロンJ装置

の中心に穴が空いていますね。そこから、装置がドーナツ型であることがわかるでしょう。

3. 一億度のプラズマの温度を測る

このような高温のプラズマの温度を測るにはどうすればよいでしょうか？ 普段よく使う棒状のガラス温度計なんかでは、もちろん計れません。高温のプラズマの温度を測るには、ドップラー効果という物理現象を利用します。例えば救急車が目の前を通り過ぎた時、近づいている時はサイレンの音が高く聞こえ遠ざかっている時は低く聞こえるという経験はありませんか。これはサイレンの音があなたの目の前で切り替わったのではなく、音を出している救急車が動いているために、発している音波の波の波長（波の山と山の間の距離）が詰められて高くなったり伸ばされて低くなったりしたために音の高さが変わったのです。これをドップラー効果と言います。もし救急車のスピードが、もっと速くなったら音はさらに高くなるでしょう。もちろん救急車が遠ざかっていたら、もっと音が低くなります。逆にどれだけ元の音より音が高くなったか、低くなったか、測ることができれば、救急車に乗らなくても救急車の走るスピードを測定することができます。

この原理を応用するのです。しかし音は使いません。実は、光も波なので、音波の代わりに光の波、光波を使うのです。オーロラを思い出してください。プラズマは光を出します。プラズマ中の粒子が発する光の波長は予めわかっていますので、この波長が縮んだか伸びたか測定することでドップラー効果を使ってプラズマ中の粒子のスピードを測定するのです。プラズマを構成する個々の粒子のスピードがわかれば、そこからプラズマの温度を計算することができます。

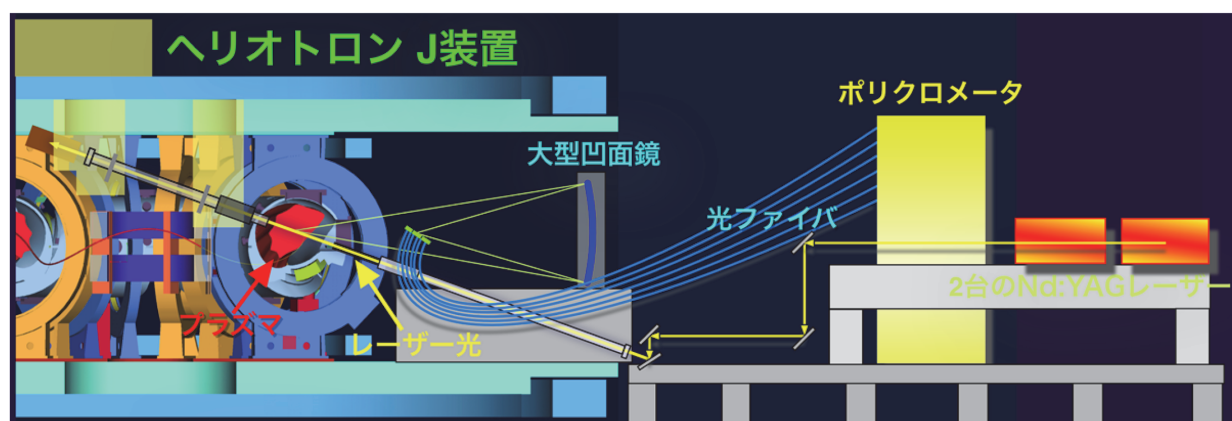


図3 ヘリオトロンJ装置のトムソン散乱計測装置

ところが実際に一億度のプラズマの温度を、この方法で測定しようとしめすと、一つ大きな壁にぶち当たります。プラズマは光を発するのですが、何と一億度もの高温になってしまうとプラズマが発する光は弱まり、ほとんど光を出さなくなってしまうのです。これでは手も足も出ません。この問題を、どうやって解決すればいいのでしょうか。実はドップラー効果は、自ら光らなくても、やってきた光を反射しても同じように起こります。野球で、投手の投げたボールのスピードを測るのに使われるスピードガンも、マイクロ波をボールにあててドップラー効果を使ってスピードを測定しています。これと同じように光らないなら、外から光を打ち込んでプラズマ中の粒子を光らせてやればいいのです。打ち込む光として強力なレーザーを使います。高温のプラズマ中の電子により反射された（物理の用語では散乱といひます）光のドップラー効果を測定するのです。この方法をトムソン散乱計測法と言ひます。

4. ヘリオトロン J 装置のトムソン散乱計測装置

図3がヘリオトロン J 装置の Nd:YAG トムソン散乱計測装置の全体図です。これではわかりにくいですから装置全体の原理図を図4に示しました。ヘリオトロン J 装置のトムソン散乱計測装置では、レーザーに Nd:YAG レーザー（波長 $1.064\mu\text{m}$ ）を用ひています。このレーザーの光は人間の目では見えない近赤外光と言われる光です。

まずヘリオトロン J 装置の中に作られているプラズマにレーザービームをレーザー伝送パイプを通して下部から斜め上方向に向かつて入射します。プラズマの電子によって散乱される光はとても弱いですが

から、大型反射天体望遠鏡でも使われている直径 80cm の大型凹面鏡を使った集光ミラーで集めます。天体望遠鏡では集めた光を目で直接見ることができますが、Nd:YAG レーザーは近赤外光なので見えません。そこで光ファイバーを接眼レンズの位置に置いて、光をポリクロメータと呼ばれる分光器に導きます。分光器とはプリズムで太陽光を七色に分解するのと同じように、散乱された光の成分を分解し（分光と言ひます）ドップラー効果による波長の伸び縮みを測定することができるのです。図5の写真がヘリオトロン J 装置のトムソン散乱計測装置です。下の方にレーザー伝送パイプがありますが、この中をレーザーが伝わっていきます。プラズマが生成される真空容器は写真の左側にあります。そこに散乱光観測窓と言われる丸窓がついていますが、そこからプラズマの散乱光が出てきます。写真の右側にあるのが集光ミラー、直径 80cm の大型凹面鏡です。接眼レンズの位置にある集光用光ファイバーは左側から上部につながっています。ポリクロメータによるドップラー効果の測定値はデータ収集装置によって自動的にコンピュータに取り込まれてプラズマの温度が計算できるようになっています。

ヘリオトロン J 装置の中に作られるプラズマは、とても高温ですが、一番温度の高い場所はプラズマの中心部分で、そこから外側に向かつて温度が下がっていきます。そのため、プラズマの中心だけでなくプラズマ断面のいろいろな場所の温度を測定する必要があります。これには先ほどの凹面鏡により散乱光の像ができる位置に 25 本の光ファイバーを並べておくことで、プラズマ断面の端から端まで電子温度が計測できるようになっています。またプラズマの温度は急速に上昇したり下降したりします。残念ながら強力なレーザー光を常に出し続けることは、とても難しいことです。しかし Nd:YAG レーザーは強力なレーザーを短い時間間隔で何度も出すことができます。そこでヘリオトロン J 装置では、0.02

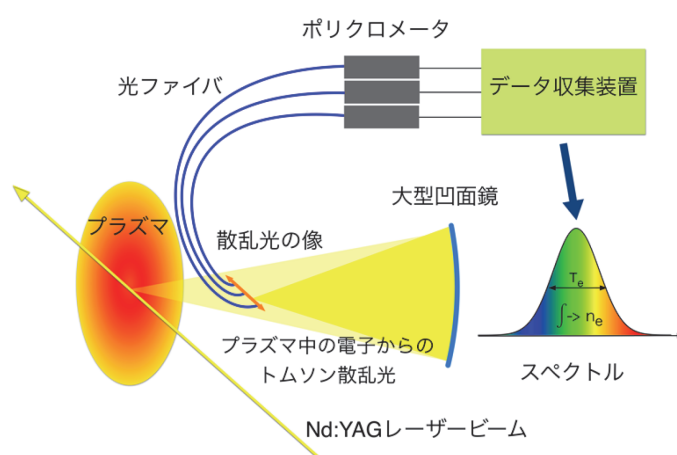


図4 トムソン散乱計測装置の原理図



図5 トムソン散乱計測装置受光システム

秒間隔でレーザーを出せる Nd:YAG レーザーを二台用いて 0.01 秒の時間間隔でプラズマの電子温度を計測するようにしています。ヘリオトロン J 装置のプラズマ生成時間は約 0.2 秒であるため、1 放電あたり約 20 の時間点で計測することができます。プラズマ生成時間が短いのに驚かれたかもしれません。しかしプラズマの温度は、一瞬で上昇するので、これでも研究には十分長い時間なのです。

5. ヘリオトロン J 装置で実現された高温プラズマの閉じ込め

ヘリオトロン J 装置によって一億度のプラズマを実現するためには、プラズマのエネルギーをできるだけプラズマの中に閉じ込めて逃さないようにすることが必要です。プラズマエネルギーが外に逃げなければ、加熱によってプラズマが得たエネルギーが、どんどんプラズマ中にたまってプラズマの温度は上昇し続けます。このプラズマエネルギーを閉じ込めて逃がさない能力を閉じ込め性能と言います。

これまで閉じ込め性能を通常の状態より向上させる特別な閉じ込め改善状態、すなわち閉じ込め特性改善モードと呼ばれる幾つかの状態が発見されプラズマの温度向上に役立ってきました。このような閉じ込め特性改善モードは、放電の途中で突然起こるものなどがあり 0.01 秒の時間間隔で、細かくプラズマの電子温度を計測できるヘリオトロン J 装置の Nd:YAG レーザートムソン散乱計測装置は、細かい時間点でプラズマの温度測定ができるので、このような現象をとらえるのに適しています。

図6はヘリオトロン J 装置において観測された、ある種の閉じ込め特性改善モードが起こった時のプラズマ断面全体の温度分布です。図は、断面の端から端までの電子温度の様子を示しています。プラズマ断面の外側で温度が低く中心に向かって高くなっているのがわかるとおもいます。ここでは、プラズマを加熱するためには電子レンジで使われているようなマイクロ波を使いますが、この実験はプラズマ

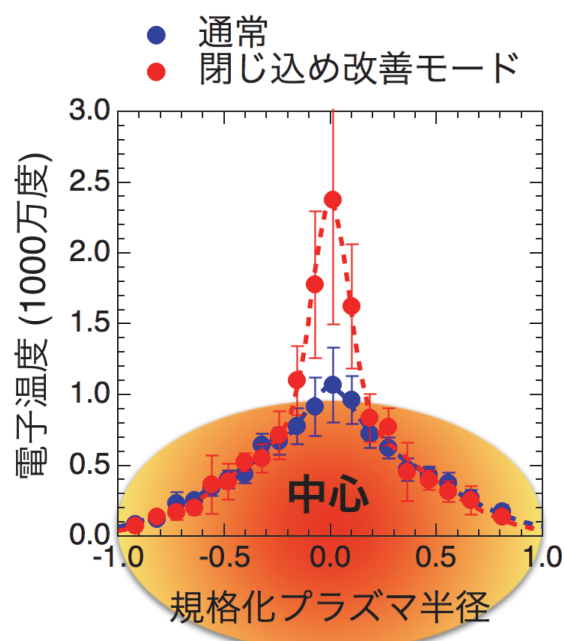


図6 トムソン散乱計測装置で測った閉じ込め改善モードのプラズマの電子温度

中心部のみを正確にマイクロ波の一種である電子サイクロトロン波によって加熱しました。通常のプラズマの温度は青い点で示されています。プラズマ中心の温度は、約 1000 万度ですね。プラズマをうまく制御して、閉じ込め特性改善モードの状態にすると、赤い点で示されているようにプラズマの中心部で電子温度が上昇し、通常の約 1000 万度の温度から約 2300 万度まで上昇しています。この温度上昇は中心部のみでプラズマの外側では温度上昇がみられていません。これは、ちょうどプラズマの温度が中心に向かって急上昇している境界でプラズマの閉じ込め性能が向上したため、エネルギーの外への流れがせき止められ、それより内側の領域で温度が上昇したのです。このような現象を専門的には”内部輸送障壁”が形成されたと言います。輸送とはプラズマエネルギーの流れのことです。つまりプラズマ内部にエネルギーの流れをくい止める障壁ができたので、プラズマ中心の温度が、どんどんあがったのです。ヘリオトロン J 装置のプラズマ中に、さらに強固な障壁を形成することができれば、プラズマの温度を、もっと上げることができるでしょう。

6. 最後に

このようにヘリオトロン J 装置によって太陽の中心と同じ高温のプラズマを生成することができています。しかし残念ながら地上で十分な核融合エネルギーを生み出すには一億度の温度が必要です。まだまだ多くの解決すべき課題がありますが 21 世紀半ばの夢の核融合エネルギー実用化を目指して研究を続けていきます。

参考文献

- [1] 松岡啓介、岸本泰明、他 SUPER サイエンス「人類の未来を変える核融合エネルギー」(核融合フォーラム編)